

文章编号: 1673-9981(2020)01-0055-05

6013 铝合金第二相的形态和结构^{*}

邝宏聪¹, 肖晓玲¹, 唐维学¹, 周 旺², 丁小理², 陈文龙¹

1. 广东省工业分析检测中心, 广东 广州 510650; 2. 广东和胜工业铝材股份有限公司, 广东 中山 528463



摘 要:应用高分辨透射电镜观察了 6013 铝合金时效处理后第二相的组织形态及结构, 结果表明其第二相有三种形态. 一种是片状析出相, 其沿 {001} 析出, 互相垂直分布, 是合金时效的产物, 是合金时效强化产生的原因; 第二种为 $Al_5(Mn, Fe)_{12}Si_7$ 相, 其尺寸约 200~300 nm, 形状似短棒状或方块状或球状, 属于立方结构, $a=1.268$ nm, $\alpha(AlMnFeSi)$ 分布在铝合金基体的晶粒内和晶界上, 其作用主要是阻碍晶粒长大, 增强 6013 铝合金的强度和断裂韧性; 第三种是硅颗粒相, 形态不规则, 颜色深浅不一, 分布于晶界上, 这类硅颗粒相认为是凝固阶段形成的杂质相.

关键词: 6013 铝合金; TEM; 第二相

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

6061 铝合金是最早应用于航空领域的 6XXX 系铝合金, 其含少量 Cu 元素, 耐腐蚀性和焊接性能较好, 但强度中等偏下. 6013 铝合金是美国铝业公司研究开发的一种新型铝合金^[1], 在 6061 合金基础上提高了 Cu 及 Si 元素的含量, 其 T6 态抗拉强度比 6061-T6 高 15%~20%, 可焊性与 6061 合金相当, 疲劳、耐腐蚀及机加工性能均优于 6061 合金. 6013 铝合金最初的应用目标是汽车工业, 通过降低零部件重量从而提高燃油效率. 该合金的耐蚀性比高强 7XXX 系合金好, 而强度比其他 6XXX 系合金高且保持优良的耐蚀性和成型性, 因而该合金在航空、航天、舰船、交通和建筑等行业有着广泛的用途^[2-4].

目前, 6013 型铝合金的研究主要集中在合金化设计、固溶时效制度对组织性能的影响等方面^[5-8], 对其微观组织的研究较少. 一般来说合金的第二相对其断裂韧性和疲劳性能有较大影响^[9], 因此对第二相尺寸、形态及微观结构的控制是工业合金生产中较为关注的问题之一.

本文将针对 6013 铝合金中第二相的形态和结构进行分析, 其结果对于精确调控铝合金产品的质量和加工精度, 提高其综合性能有积极的意义.

1 实 验

1.1 试 样

实验采用固溶+时效处理的 6013 铝合金. 合金的化学成分列于表 1.

表 1 6013 铝合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of 6013 aluminum alloy

成分	Mg	Si	Mn	Fe	Cu	Al
含量 $w/\%$	0.99	0.71	0.27	0.14	0.87	余量

1.2 方 法

将 6013 铝合金用电火花先切割成直径 3 mm 的圆棒, 然后用精密切割机将直径 3 mm 的圆棒切成厚约 0.3 mm 的圆片, 再双面预减薄厚度至

收稿日期: 2019-09-19

^{*} 基金项目: 广东省科学院发展专项资金项目(2017GDASCX-0114); 中山市科技局项目资助(2017GIFC0002)

作者简介: 邝宏聪(1987-), 男, 广东肇庆人, 中级工程师, 工学学士, 研究方向为金属材料微观结构分析.

0.1 mm 的圆片,最后采用 Tenupol-5 电解双喷减薄仪制备透射电镜试样,电解液成分为硝酸 250 ml+甲醇 750 ml,工作温度 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$,电压为 20 V. 制成的试样均在 JEM-2100F 透射电镜上观察和分析,加速电压 200 kV.

2 结果及讨论

图 1 为 6013 铝合金 T6 处理后的组织形态. 从图 1 可见,在电子束 $B=[001]_{\text{Al}}$ 基体位向下的形态,除基体组织外,有大量且互相垂直排列的析出相. 图 1(a) 右上角插图为本基体 Al 的 $[001]$ 晶带轴衍射花

样,证实这些析出相沿 Al 基面 (001) 析出. 图 1(b) 显示这些析出相沿基轴 $[010]$ 和 $[100]$ 方向生长,互相垂直排列,长短不一,其中“黑点”是平行于电子束 $B=[001]$ 方向生长的析出相的“端面”. 图 1(c) 和图 1(d) 是 6013 铝合金 T6 处理后的高分辨照片,同样可见片状的析出相及析出相的“端面”. 据报道^[10-12] 这些大小不一的析出相是时效处理的产物,使得 6013 铝合金比其它 6XXX 铝合金有着更高的屈服强度.

图 2 为 6013 铝合金固溶相的形态. 从图 2 可见,固溶相似短棒状或方块状或球状,颗粒大小约 200~300 nm,分布于铝基体晶粒内和晶界上.

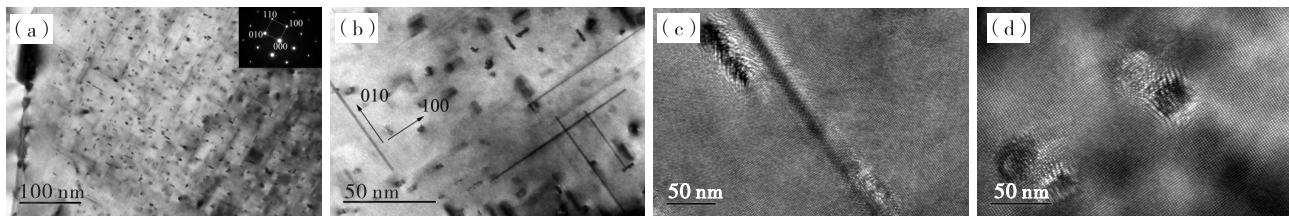


图 1 6013 铝合金 T6 处理后的组织形态

(a)和(b)明场像;(c)和(d)高分辨像

Fig. 1 Morphology of 6013 Al alloy with T6 treatment

(a)and(b)BF;(c)and (d)HRTEM

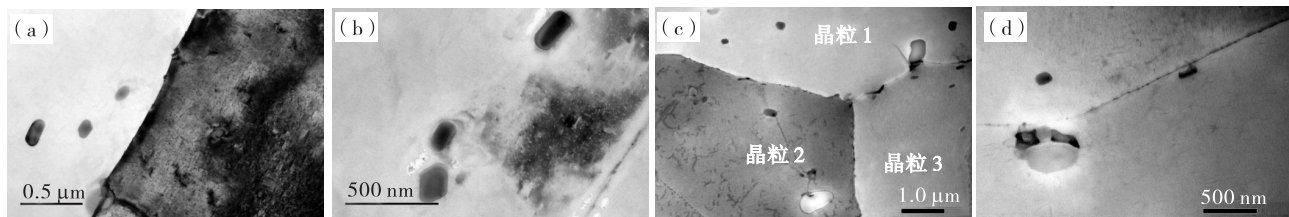


图 2 第二相 $\text{Al}_5\text{Mn}_{12}\text{Si}_7$ 形态

(a)和(b)TEM 像;(c)和(d)STEM 像

Fig. 2 Morphology of second phase particles in 6013 Al alloy

(a)and(b)BF;(c)and (d)STEM

图 3 为固溶相的 EDS 成分曲线. 从图 3 可见,该相由 Al, Si 和 Mn 等元素组成. 图 4 和图 5 为固溶相颗粒的形态及绕低指数衍射矢量定向倾转获得的系列选区电子衍射花样图. 从图 4 和图 5 可见,固溶相颗粒形态为条状. 为确定此条状弥散相的晶体结构,通过倒空间阵点三维重构,分析确定该第二相与 $\text{Al}_5\text{Mn}_{12}\text{Si}_7$ 相吻合(详见 JCPDS 号 06-0669 卡片),属于立方结构, $a=1.268\text{ nm}$.

进一步通过测量和晶体学参数计算(参考立方晶体的面间距和面间距夹角的计算公式^[13]),衍射花样标定结果见图 4(b)~(d)和图 5(b)~(d). 图 4(b)为衍射花样的晶带轴 $B=[011]$ (即电子束方向,以下类似),此时绕衍射矢量 (200) 倾转约 12° 和 8° ,依次获得 $B=[023]$ 和 $B=[021]$ 晶带轴的衍射花样(图 4(c)和图 4(d));图 5(b)为衍射花样的晶带轴 $B=[001]$,此时绕衍射矢量 (020) 倾转约 20° .

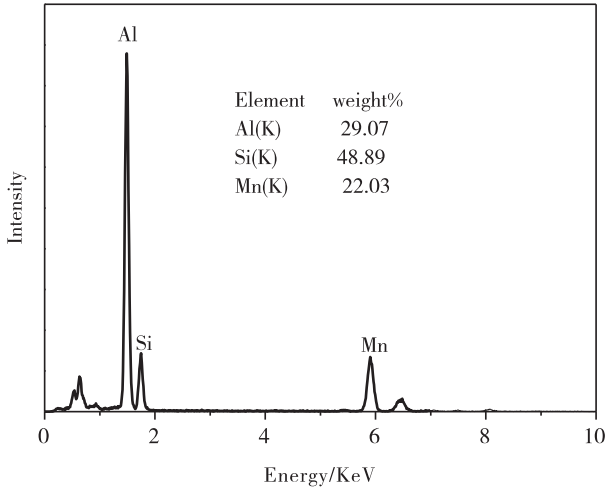


图 3 第二相能量散射谱线

Fig. 3 EDS spectrum of second phase

和 8° , 依次获得 $B=[103]$ 和 $B=[102]$ 晶带轴的衍射花样(图 5(c)和图 5(d)). 国外研究者 C. Barbosa 等人证明^[10], $\alpha(\text{AlMnFeSi})$ 颗粒是固溶相, 不受时效处理的影响, 当其在晶界分布时能阻碍晶粒的长大, 这不仅增强了 6013 铝合金的强度, 还增强了断裂韧性.

图 6 为 6013 铝合金 STEM 照片和元素分布图的照片. 从图 6 可见, 除了有 $\text{Al}(\text{Mn, Fe})\text{Si}$ 相外, 还有一类是硅相, 该相形态不规则, 颜色深浅不一, 分布于晶界上. 这类硅颗粒相认为是凝固阶段形成的^[14].

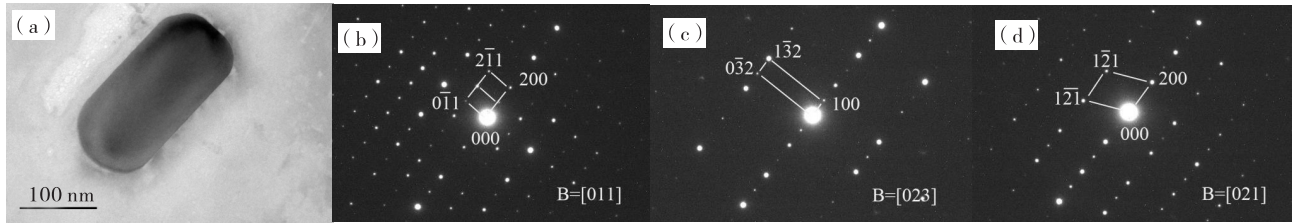


图 4 第二相颗粒的形态及其绕低指数(200)倾转的衍射花样

Fig. 4 Morphology of second phase particles and selected area diffraction patterns being tilted around diffraction vector (200)

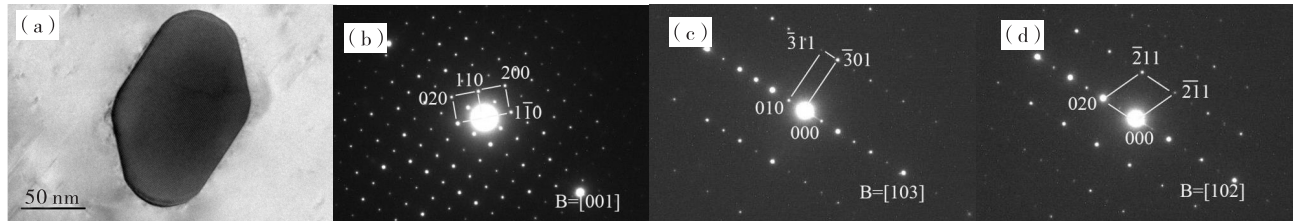


图 5 第二相颗粒的形态及其绕低指数(020)倾转的衍射花样

Fig. 5 Morphology of second phase particles and selected area diffraction patterns being tilted around diffraction vector (020)

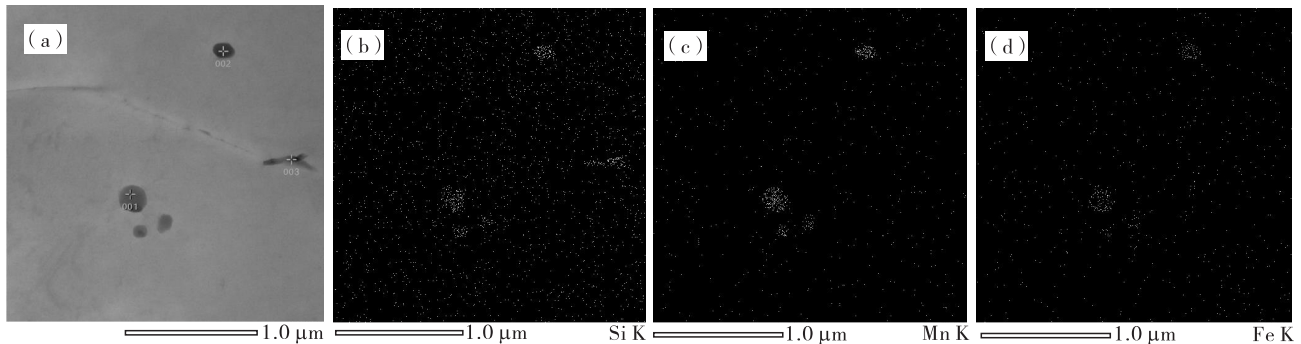


图 6 第二相的形态

(a)TEM 像;(b)001 处能谱面扫;(c)002 处能谱面扫;(d)003 处能谱面扫

Fig. 6 Morphology of second phase particles in 6013 Al alloy

(a)STEM;(b)001 EDS;(c)002 EDS;(d)003 EDS

3 结论

应用高分辨透射电镜观察了 6013 铝合金时效组织形态,有三种形态的第二相。

(1)片状析出相,在 Al 基面上沿 {001} 析出,相互垂直分布。其主要起时效强化的作用,使得 6013 铝合金比其它 6XXX 铝合金有着更高的屈服强度。

(2) $Al_5(Mn,Fe)_{12}Si_7$ 相,尺寸约 200~300 nm,形状似短棒状或方块状或球状,属于立方结构, $a=1.268$ nm,分布铝合金基体的晶粒内和晶界上。其主要作用是阻碍晶粒长大,增强 6013 铝合金的强度和断裂韧性。

(3)硅颗粒相,形状不规则,颜色深浅不一,分布于晶界上。该相被认为是凝固阶段析出相,为杂质相。

参考文献:

- [1] 张君尧,美国铝业公司 6013 铝合金简介[J],轻合金加工技术,1995(3):24-26.
- [2] DERRY C G, ROBSON J D. Characterisation and modelling of toughness in 6013-T6 aerospace aluminium alloy friction stir welds [J]. Materials Science and Engineering A,2008,490(1-2): 328-334.
- [3] KANEKO R S, BAKOW L, LEE E W. Aluminum alloy 6013 sheet for new US navy aircraft[J]. JOM,1990,42(5): 16-18.
- [4] CHAUDHURI J, TAN V, PATNI K, et al. Comparison of corrosion-fatigue properties of 6013 bare, aleclad 2024, and 2024 bare aluminum alloy sheet materials[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 1992(1): 91-96.
- [5] LIU Manping, JIANG Tinghui, WANG Jun, et al. Aging

behavior and mechanical properties of 6013 aluminum alloy processed by severe plastic deformation [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014(12): 3858-3865.

- [6] 张福豹. 6013 型铝合金的微合金化与性能初步研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2011.
- [7] 艾世杰. 新型 6013 铝合金的热处理工艺与组织性能研究[D]. 江苏: 江苏大学, 2013.
- [8] ABDALA M R W S, GARCIA DE BLAS J C, BARBOSA C, et al. Thermoelectrical power analysis of precipitation in 6013 aluminum alloy [J]. Materials Characterization, 2008, 59(3): 271-277.
- [9] HUSKINS E L, CAO B, RAMESH K T. Strengthening mechanisms in an Al-Mg alloy[J]. Mater Sci Eng A, 2010, 527: 1292-1298.
- [10] CHAKRABARTI D J, CHEONG B, LAUGHLIN, D E. Automotive Alloys II, The Minerals [C]. Warrendale: Metals and Materials Society, 1998: 27-44.
- [11] BARBOSA C, REBELLO J M A, ACSELRAD O, et al. Identification of precipitates in 6013 aluminum alloy (Al-Mg-Si-Cu) [J]. Zeitschrift Für Metallkunde, 2002, 93(3): 208-211.
- [12] 薛学功. 6013 铝合金性能与组织的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2003
- [13] EDINGTON J W. Practical Electron Microscopy in Materials Science [M]. London: Van Nostrand Reinhold International, 1976: 283
- [14] YAMAMOTO A, TSUBAKINO H, SUEHIRO A, et al. Effects of excess si, excess Mg and Fe on precipitation in 6061 aluminum alloys during recycling process[J]. Materials Science Forum, 2000, 331-337: 1125-1132.

Morphology and structure of the second phase of 6013 aluminium alloy

KUANG Hongcong¹, XIAO Xiaoling¹, TANG Weixue¹, ZHOU Wang², DING Xiaoli², CHEN Wenlong¹

1. Guangdong Industry and Analysis Testing Center, Guangzhou 510650, China; 2. Guangdong Hoshion Industrial Aluminium Co., Ltd., Zhongshan 528463, China

Abstract: Morphology and microstructure of the second phases in 6013 alloy being solution+aging

(下转第 86 页)

(上接第 58 页)

treatment were investigated using high resolution transmission electron microscope (JEOL 2100F), and has three morphologies. The first is plate-shaped precipitates, which precipitates along $\{001\}$ and is vertically distributed to each other. These precipitates were formed during the process of aging, which is the cause of the alloying aged hardening. The second one, about 200~300 nm width, shaped like short-rod, discrete lump-like or globular, is $\text{Al}_5(\text{Mn}, \text{Fe})_{12}\text{Si}_7$ phase, which has a cubic structure with a unit cell of $a=12.68$ nm were observed in 6013 aluminium alloy. These $\alpha(\text{AlMnFeSi})$ is distributed in the grains and grain boundaries of the 6013 aluminium alloy matrix, and its role is mainly to hinder the grain growth and enhance the strength and fracture toughness of the 6013 aluminum alloy. The third one is silicon particles phase have irregular shapes and different color and are distributed on grain boundaries. Such silicon particle phases are considered to be impurity phase formed during the solidification phase.

Key words: 6013 aluminium alloy; TEM; the second phase